

Terbit online pada laman web jurnal <http://jurnaldampak.ft.unand.ac.id/>

Jurnal Dampak

| ISSN (Print) 1829-6084 | ISSN (Online) 2597-5129|



Artikel Penelitian

Dinamika Konsentrasi Oksigen Terlarut Akibat Limbah Cair Domestik di Hulu Sungai Citarum Menggunakan Model Dinamik

Fanny Novia^a, Laila Febrina^a^aJurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Sahid Jakarta, Jalan Prof. Dr Soepomo No.84, Jakarta, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 1 April 2018

Revisi Akhir: 30 Mei 2018

Diterbitkan Online: 31 Juli 2018

KATA KUNCI

Model Dinamik

DO

Sungai Citarum

STELLA®

KORESPONDENSI

Telepon: -

E-mail: fannynovia6@gmail.com

A B S T R A C T

High pollutant load from municipal discharges around the upstream of Citarum River contributes to the water quality problems of the river. Dynamic modelling was developed to analyze the behaviour of dissolved oxygen in upper of Citarum river using STELLA® as a tool. The modelling area consist of four segments namely Wangisagara, Jembatan Koyod, after Cisirung WWTP and Nanjung. Calibration and validation was done to get the most approaching simulated data to actual data. Average Mean Error (AME) and Average Variation Error (AVE) for all segments was 1.65% and 5.8%, therefore the developed model was valid. Sensitivity analysis shown that the dynamic of dissolved oxygen in upper of Citarum river was most affected by BOD load from municipal sources, decay coefficient of BOD (Kd), maximum rate of photosynthesis (pm) and fractional duration of daylight (f).

PENDAHULUAN

Dinamika oksigen terlarut (DO) di perairan dipengaruhi oleh banyak faktor yaitu faktor fisika dan proses biogeokimia (Huang *et al.*, 2017). Faktor fisika seperti turbulensi air (Thomann dan Mueller, 1987), temperatur (Radwan *et al.*, 2003), intensitas cahaya dan kecepatan angin (Hull *et al.*, 2007) dan Boyd *et al.*, 1991), kecepatan aliran dan kedalaman sungai (Churcill, 1962) sangat mempengaruhi perubahan nilai DO di perairan. Proses biogeokimia yang mempengaruhi nilai DO di sungai adalah kebutuhan oksigen biokimia (BOD), proses nitrifikasi, kebutuhan oksigen sedimen (SOD), respirasi alga (Thomann dan Mueller, 1987) dan fotosintesis (Huang *et al.*, 2017).

Sungai Citarum merupakan salah satu sungai yang ada di provinsi Jawa Barat dengan kondisi kualitas perairan yang memprihatinkan. Nasha (2016) menyebutkan dari tahun 2011 sampai tahun 2014, indeks pencemar Sungai Citarum termasuk kepada kategori tercemar berat. Berdasarkan data hasil pemantauan kualitas air dari Badan Pengendalian Lingkungan Daerah (BPLHD) Jawa Barat pada tahun 2015 menunjukkan ruas bagian hulu dari Sungai Citarum tergolong ke kategori tercemar berat dengan nilai DO bahkan

mencapai nilai 0 mg/L. Beban pencemar yang masuk ke hulu Sungai Citarum mencapai angka 200.048 ton BOD/hari dari limbah domestik (Arief dkk, 2012), 81.363 ton BOD/hari dari limbah industri dan 14.367 ton BOD/hari dari limbah peternakan (Bukit dan Yusuf, 2002).

Permasalahan rendahnya kandungan DO yang ada di Sungai Citarum ini perlu dilihat secara holistik. Parameter DO merupakan parameter yang dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, maka analisa permasalahan ini dengan menggunakan metode sistem dinamik perlu dilakukan. Salah satu alat yang dapat digunakan dalam metode sistem dinamik ini adalah pemodelan dinamik. Pemodelan dinamik merupakan pemodelan yang bertujuan untuk menggambarkan perilaku (*behaviour*) suatu sistem yang kompleks sepanjang waktu (*overtime*).

Pemodelan dinamik telah diaplikasikan dalam menyelesaikan permasalahan kualitas air antara lain untuk pemodelan air dan sedimen di Lower Churcill River (Nalcor Energy Project, 2009), proses eutrofikasi di Waduk Roxo, Portugal (Gurung, 2007), dinamika DO di daerah estuari, Australia (Bruce *et al.*, 2014), pemodelan dinamik DO dengan BOD di Sungai Cikapundung (Philomela dan Sudradjat, 2013) dan pemodelan dinamik DO di Waduk Cirata (Novia *et al.*, 2015).

Penelitian ini bertujuan untuk membangun model dinamik konsentrasi DO di hulu Sungai Citarum. Model dinamik akan memberikan gambaran dinamika DO dan bagaimana pengaruh limbah domestik terhadap konsentrasi DO pada hulu Sungai Citarum di titik pengamatan Wangisagara, Jembatan Koyod, setelah IPAL Cisirung dan Nanjung.

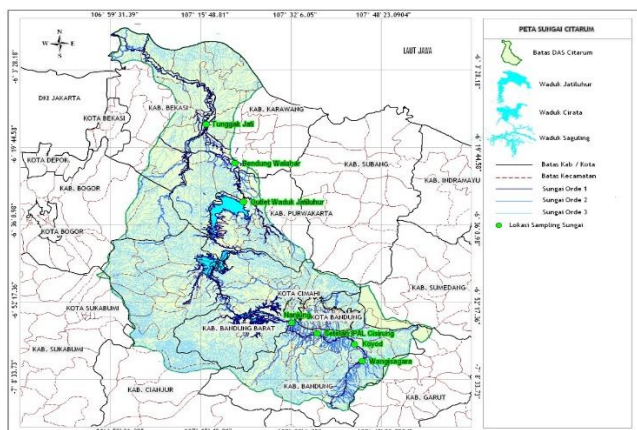
METODOLOGI

Wilayah Sungai Citarum yang akan dijadikan lokasi penelitian adalah bagian hulu Sungai Citarum. Titik lokasi penelitian terdiri dari ruas Wangisagara, Koyod, dan setelah IPAL Cisirung. Lokasi detail dari masing-masing titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Lokasi Titik Lokasi Penelitian di Bagian Hulu Sungai Citarum

No	Lokasi	Alamat	Koordinat GPS
1	Wangisagara	Jalan Simpang Radug, Kp. Radug, Desa Wangisagara, Kec. Majalaya, Kab. Bandung	107° 44'54,7" BT 07° 04'26,8" LS
2	Koyod	Jembatan Koyod, Desa Rancakusumba, Kec. Solokan Jeruk, Kab. Bandung	107° 43'31,0" BT 07° 00'55,1" LS
3	Setelah IPAL Cisirung	Ds. Andir, Kec. Baleendah, Kab. Bandung	107° 36'46,0" BT 06° 58'42,1" LS
4	Nanjung	Ds. Nanjung, Kec. Soreang, Kab. Bandung	107° 32'09,1" BT 06° 56'29,8" LS

(Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2014)



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian
(Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018)

Dalam membuat model terkait kualitas air, banyak faktor yang menjadi penghambat antara lain minimnya ketersediaan data serta keterbatasan waktu dan biaya yang ada. Batasan model pada penelitian ini antara lain:

- Masing-masing ruas sungai dalam penelitian ini dianggap dalam keadaan *completely mixed*.

- Batasan komponen proses dan jenis polutan limbah yang mempengaruhi dinamika DO dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Proses dan Jenis Polutan Limbah dalam Model

Reoksigenasi	Deoksigenasi	Polutan Limbah Domestik
Reaerasi dari atmosfer	Nitrifikasi	BOD
Fotosintesis	SOD	
DO inflow anak sungai	BOD	

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang disesuaikan dengan tahapan pembuatan sistem model dinamik, yaitu (Sterman, 2000):

- Definisi Masalah**
Permasalahan yang ditemukan antara lain rendahnya nilai oksigen terlarut di sungai, dimana nilai oksigen terlarut tidak memenuhi nilai standar baku mutu.
- Konsep Model**
Pada tahap ini, permasalahan digambarkan secara sederhana dalam sebuah konsep model dan diagram *causal loop* yang menggambarkan keterkaitan antara komponen dalam sistem. Diagram *causal loop* menggambarkan umpan balik positif dan negatif yang mempengaruhi nilai konsentrasi oksigen terlarut di sungai
- Formulasi Model Sistem Dinamik**
Pada tahap ini, faktor-faktor yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut akan digambarkan dalam persamaan akumulasi dan koefisien. Persamaan dan koefisien yang digunakan untuk membangun model diambil dari literatur dan penelitian terkait.
- Pengambilan Data Sekunder**
Data sekunder didapatkan dari BPLHD Jawa Barat dan Balai Besar Wilayah Sungai Citarum. Data sekunder yang dibutuhkan adalah data kualitas air Sungai Citarum, debit dan kecepatan aliran tahun 2013 - 2017.
- Pembuatan Model dengan Program Komputer**
Pada tahap ini dilakukan pembuatan struktur model dinamik berdasarkan diagram *causal-loop* dengan menggunakan bantuan software STELLA®.
- Kalibrasi dan Validasi Model.**
Model yang sudah dibangun sebelumnya dikalibrasi dengan cara *trial and error* yaitu mengganti nilai koefisien-koefisien yang digunakan dalam model. Validasi model menggunakan uji statistik yaitu menggunakan *Absolute Means Error* (AME) dan *Absolute Variation Error* (AVE). Model dinyatakan valid jika nilai AME ≤ 5% nilai AVE ≤ 30% (Satrio dan Suryani, 2017). Persamaan untuk menghitung nilai AME adalah:

$$AME = \text{abs} \frac{(X_s - X_a)}{X_a} \quad (1)$$

Persamaan untuk menghitung nilai AME adalah:

$$AVE = \frac{abs(Ss - Sa)}{Sa} \quad (2)$$

$$Ss = \sqrt{\frac{\sum (Si - Xs)^2}{N}} \quad (3)$$

$$Sa = \sqrt{\frac{\sum (Ai - Xa)^2}{N}} \quad (4)$$

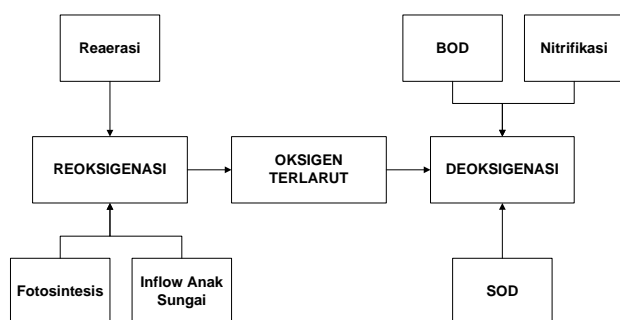
g. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas pada model bertujuan untuk menguji respon sistem terhadap berbagai variasi input parameter. Hasil dari analisis sensitivitas ini dapat juga digunakan untuk mengetahui parameter yang paling sensitif mempengaruhi nilai DO di hulu Sungai Citarum.

HASIL DAN PEMBAHASAN

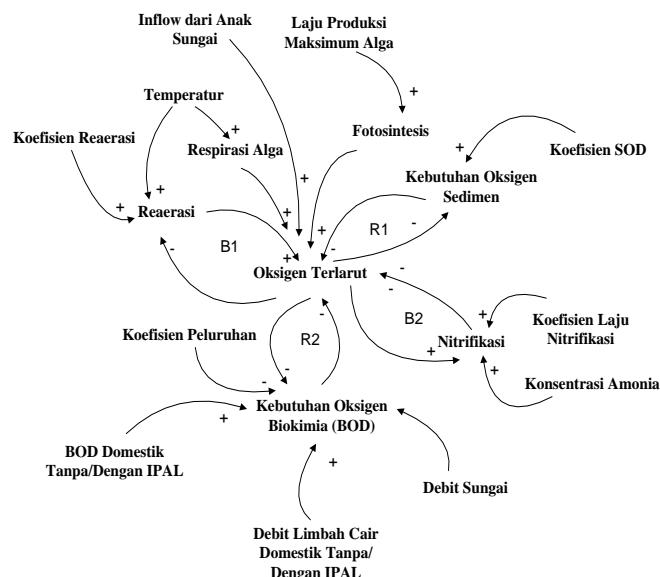
Konsep Model

Konsep model dibuat untuk menjadi dasar dalam pembuatan model dan bersumber dari berbagai literatur terkait dan penelitian terdahulu. Thoman dan Mueller (1987) menyebutkan DO bersumber dari beberapa proses yaitu reaerasi dari atmosfer, produksi oksigen dari fotosintesis dan DO dari inflow sungai. Sedangkan DO dapat berkurang akibat beberapa proses yaitu oksidasi limbah karbon, oksidasi limbah nitrogen, kebutuhan oksigen dari sedimen dan pemakaian oksigen oleh biota air. Philomela dan Sudradjat (2015) menyebutkan DO di sungai dipengaruhi oleh komponen reaerasi, DO dari inflow anak-anak sungai, BOD dari limbah domestik dan konsentrasi ammonia (NH_3). Dalam penelitian ini, komponen proses yang mempengaruhi nilai DO terdiri dari reaerasi, fotosintesis, DO dari inflow anak sungai, nitrifikasi, BOD dan SOD. Konsep model dari oksigen terlarut di sungai dapat dilihat di Gambar 2.



Gambar 2. Konsep Model Oksigen Terlarut di Hulu Sungai Citarum

Hubungan sebab akibat yang terjadi di dalam sistem dapat digambarkan melalui diagram *causal-loop*. Diagram *causal-loop* menggambarkan bagaimana keterkaitan antara komponen-komponen yang terdapat di dalam sistem. Dalam sistem nilai DO di sungai, terdapat beberapa proses utama yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut yaitu proses reaerasi, BOD dari limbah domestik, proses nitrifikasi dan SOD. Diagram *causal loop* dari system dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Causal Loop Model Dinamik Oksigen Terlarut
Formulasi Model dan Pembuatan Struktur Model

Koefisien dan parameter yang digunakan dalam model antara lain adalah koefisien rearasi (K_L), koefisien peluruhan BOD (K_d), koefisien nitrifikasi (K_n), koefisien laju respirasi sedimen (K_s) dan laju produksi oksigen maksimum alga. Pada tahap berikutnya, nilai koefisien ini dikalibrasi. Masing-masing koefisien ini memiliki rentang nilai sesuai dengan literatur yang ada. Rentang nilai masing-masing koefisien dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rentang Nilai Koefisien dalam Model

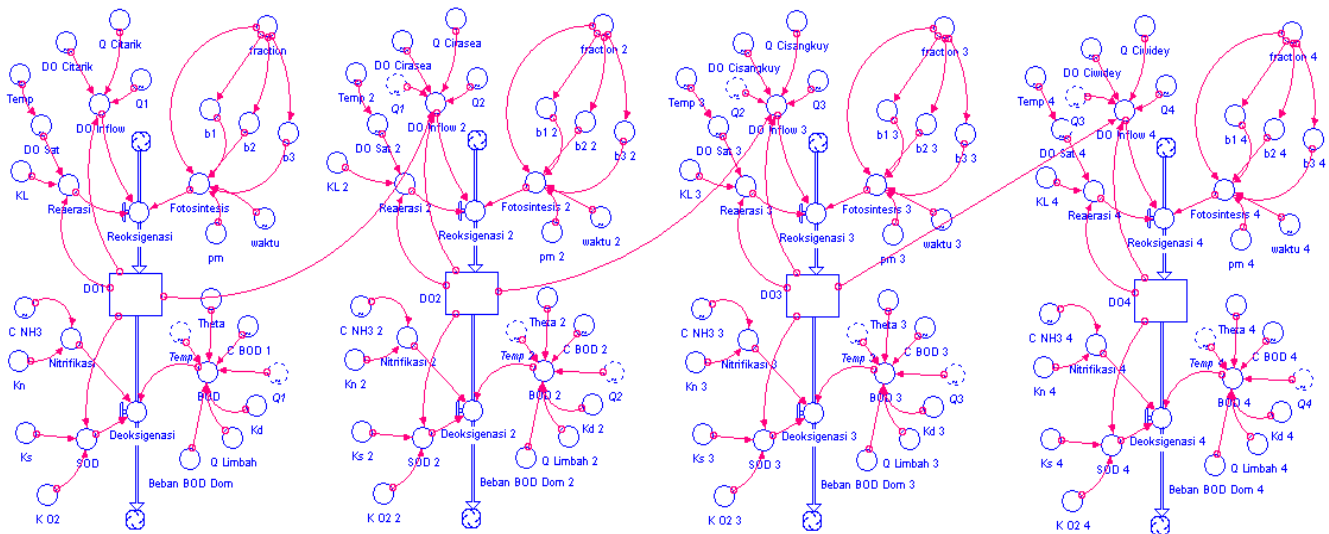
Koefisien dan Parameter	Rentang Nilai	Satuan	Sumber
Koefisien Peluruhan BOD (K_d)	0.1 - 0.23	hari ⁻¹	Penn dkk, 2007
Koefisien Nitrifikasi (K_n)	0.1 - 0.5	hari ⁻¹	Lee dan Baker, 2007
Koefisien Laju Respirasi Sedimen (K_s)	0.5 - 1.4	hari ⁻¹	Jamu dan Piedrahita, 2002
Koefisien Empiris (θ)	1.012 - 1.047	hari ⁻¹	Benefeld, 1980
Laju Produksi Oksigen Maksimum Alga (P_m)	3.36 - 31.2	mg/L	Talling, 1956

Tabel 4. Simbol Komponen dalam Model Dinamik DO

Komponen Sistem Oksigen Terlarut	Simbol dalam STELLA®
Oksigen terlarut (DO)	Stocks
Reoksigenasi, deoksigenasi	Flows
Koefisien reaerasi, koefisien deoksigenasi, koefisien laju respirasi sedimen, temperatur, debit	Converters
Faktor kali	Connectors

Pembuatan struktur model dilakukan dengan menggunakan STELLA® sebagai alat bantu. Parameter DO dalam model dilambangkan sebagai *stock*, parameter dan koefisien lain yang mempengaruhi DO dilambangkan dalam *flow*. Simbol

komponen yang digunakan dalam model dinamik dapat dilihat pada Tabel 4. Struktur model DO di hulu Sungai Citarum menggunakan STELLA® dapat dilihat di Gambar 4.



Gambar 4. Struktur Model Oksigen Terlarut Menggunakan STELLA®

Keterangan Notasi pada Model:

DO 1 : DO Wangisagara
DO 2 : DO Jembatan Koyod
DO 3 : DO Setelah IPAL Cisirung
DO 4 : DO Nanjung
Temp : Temperatur
pm: Laju produksi oksigen maksimum alga
f: fraksi lamanya matahari bersinar
b1, b2, b3: notasi bn untuk rumus fotosintesis
f: fraksi lamanya matahari bersinar
b1, b2, b3: notasi bn untuk rumus fotosintesis

K_d : Koefisien peluruhan
Theta: Koefisien empiris
 K_s : koefisien laju respirasi sedimen spesifik
 K_{O_2} : koefisien half-saturation oksigen
 K_n : Koefisien nitrifikasi
C BOD: Konsentrasi BOD di sungai
C NH₃: konsentrasi ammonia di sungai
Beban BOD Dom : Beban BOD Domestik
Q : Debit
DO sat: Konsentrasi DO jenuh

Kalibrasi dan Validasi

Model dikalibrasi dengan mengganti nilai koefisien-koefisien (*trial and error*) dalam model. Nilai koefisien yang digunakan dalam model setelah kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Koefisien dalam Model setelah Kalibrasi

	Wangisagara	Jembatan Koyod	Setelah IPAL Cisirung	Nanjung
Koefisien Reaerasi (KL)	0.36	0.5	0.3	0.2
Koefisien Peluruhan BOD (Kd)	0.11	0.19	0.1	0.12
Koefisien Nitrifikasi (Kn)	0.26	0.5	0.1	0.1
Koefisien Laju Respirasi Sedimen (Ks)	1.01	0.5	0.7	1.3
Koefisien Empiris (θ)	1.041	1.030	1.040	1.041
Konstanta Half-saturation O ₂ (K _{O2})	1.4	1.4	1	1.3
Laju Produksi Oksigen	3.7	6	4.5	3.6

	Wangisagara	Jembatan Koyod	Setelah IPAL Cisirung	Nanjung
Maksimum Alga (Pm)				
Fraksi Lamanya Matahari Bersinar (f)	0.42	0.42	0.42	0.42

Tabel 6. Nilai AME dan AVE untuk Validasi

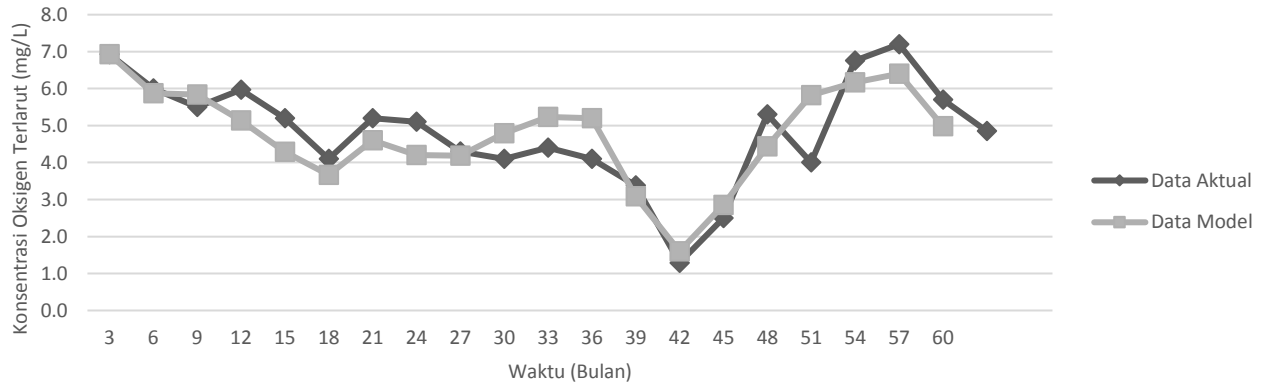
	Wangisagara a	Jembatan Koyod	Setelah IPAL Cisirung	Nanjung g
Average Mean Error (%)	1.7	1.5	0.9	2.5
Average Variatio n Error (%)	2.1	6.5	12	2.7

Hasil simulasi model menggunakan STELLA® menunjukkan pola fluktuasi yang mendekati *behavior* dari data aktual DO di hulu Sungai Citarum. Kondisi oksigen terlarut di titik Wangisagara masih tergolong cukup baik, hal ini dikarenakan daerah tersebut bukan daerah yang padat

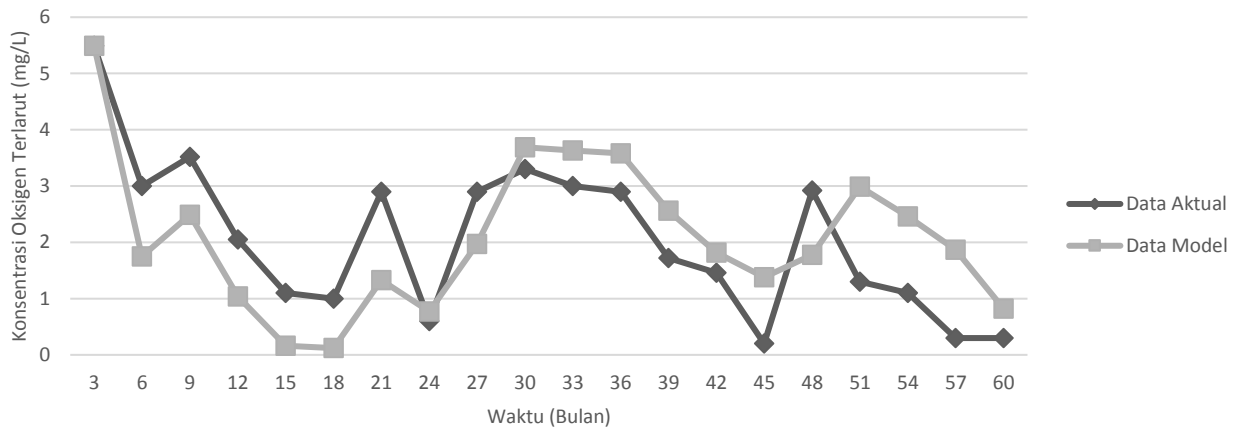
<https://doi.org/10.25077/dampak.15.1.7-13.2018>

penduduk. Beban BOD pada Jembatan Koyod dan setelah IPAL Cisirung cenderung lebih tinggi dikarenakan di sekitar daerah tersebut merupakan daerah padat penduduk. Disamping itu, limbah cair domestik di daerah tersebut belum terjangkau fasilitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) domestik di Bojongsoang. Nanjung merupakan wilayah sungai yang menerima beban BOD dari limbah domestik yang belum terolah sekaligus menerima air limbah

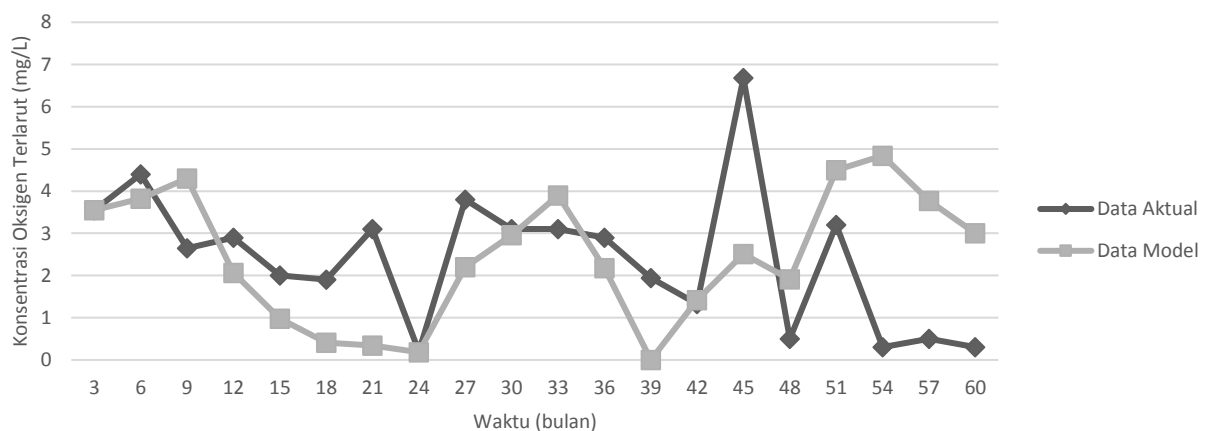
hasil olahan IPAL Bojongsoang, dimana rata-rata beban BOD dari efluen IPAL adalah 2500 kg/hari (Salim, 2000). Hal ini menyebabkan DO di titik ini lebih rendah dibandingkan titik lainnya. Dinamika DO pada titik Wangisagara, Jembatan Koyod dan setelah IPAL Cisirung, Nanjunh dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



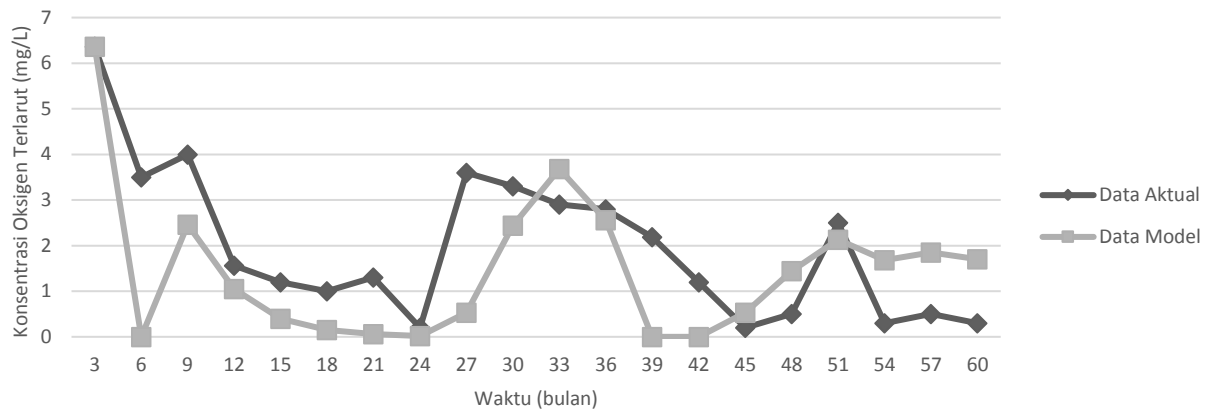
Gambar 5. Grafik Data Aktual dan Data Model di Titik Wangisagara



Gambar 6. Grafik Data Aktual dan Data Model di Titik Jembatan Koyod



Gambar 7. Grafik Data Aktual dan Data Model di Titik Setelah IPAL Cisirung



Gambar 8. Grafik Data Aktual dan Data Model di Titik Nanjung

Analisa Sensitivitas

Analisa sensitivitas dilakukan untuk mengetahui parameter yang paling mempengaruhi dinamika DO di hulu Sungai Citarum. Berdasarkan hasil analisa sensitivitas, parameter yang paling mempengaruhi dinamika DO di hulu Sungai Citarum adalah beban BOD, koefisien peluruhan (K_d), koefisien reaerasi, laju produksi oksigen maksimum alga (μ_m) dan koefisien respirasi sedimen (K_s). Koefisien reaerasi sangat mempengaruhi dinamika DO disebabkan karena adanya faktor kecepatan aliran di sungai. Pengaruh koefisien sedimentasi menunjukkan bahwa kondisi sedimen yang cukup tinggi di sungai tersebut. Laju produksi maksimum alga juga sangat mempengaruhi dinamika DO menunjukkan bahwa fotosintesis memegang peranan penting dalam proses reoksigenasi di sungai.

SIMPULAN

Model dinamik dibangun dengan melibatkan berbagai parameter dan koefisien yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut di sungai, yaitu reaerasi, fotosintesis, nilai BOD, SOD, dan proses nitrifikasi. Simulasi model menunjukkan nilai AME dan AVE yang memenuhi persyaratan sehingga model dapat dinyatakan valid. Dinamika DO di hulu Sungai Citarum paling sensitif dipengaruhi oleh beban BOD dari limbah domestik, nilai koefisien peluruhan untuk BOD, koefisien reaerasi, koefisien sedimentasi dan koefisien yang terkait dengan proses fotosintesis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan pada DP2M DIKTI. Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Penelitian Dosen Pemula dari DP2M DIKTI dengan nomor kontrak No.69.02/USJ-11/H.56/2018.

REFERENSI

- Arief, Happy., Masyamsir & Dhahiyat, Yayat. (2012). Distribusi Kandungan Logam Berat Pb dan Cd pada Kolom Air dan Sedimen Daerah Aliran Sungai Hulu Citarum. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, Vol. 3, 175-182
- Benefield, Larry D & Randall, Clifford. (1980). *Biological Process Design for Wastewater Treatment*. New York: Prentice – Hall Inc.
- Boyd, Claude E & Coddington, David Teichert (1991). Relationship Between Wind Speed and Reaeration in Small Aquaculture Ponds. *Aquaculture Engineering*, Vol. 11, 121-131
- Bukit, Nana Terangna & Yusuf, Iskandar A. (2002). Beban Pencemar Limbah Industri dan Status Air Sungai Citarum. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol. 3, 98-106
- Feng, M.L, Zhang., L.X & Shen, X.M (2012). Net Ecosystem Metabolism Simulation by Dynamic Dissolved Oxygen Model in Yellow River Estuary, China. *Procedia Environmental Sciences*, 13 (2012) 807 – 817
- Huang, Jingshui., Yin, Hailong., Chapra, Steven C & Zhou, Qi (2017). Modelling Dissolved Oxygen Depression in an Urban River in China. *Journal Water* Vol. 9, 1-19
- Hull, Vincent., Parrella, Luisa & Falcucci, Margherita (2008). Modelling Dissolved Oxygen Dynamics in Coastal Lagoons. *ScienceDirect Ecological Modelling*, 211 (2008), 468–480
- Jamu, D.M & R.H Piedrahita (2002). An Organic Matter and Nitrogen Dynamics Model for the Ecological Analysis of Integrated Aquaculture Systems: I. Model Development and Calibration. *Elsevier Environmental Modelling & Software*, 17 (2002), 571–582
- Lee, Leslie A. Farnsworth dan Baker, Lawrence A (2000): Conceptual Model of Aquatic Plant Decay and Ammonia Toxicity for Shallow Lakes. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 3
- Novia, Fanny; Priana Sudjono and Arief Sudradjat. (2015). Dynamic of Dissolved Oxygen at Inlet Zone of Fish Cage Area in Cirata Reservoir, West Java, Indonesia. *Proceeding of The 1st Young Scientist International Conference of Water Resources Development and Environmental Protection*, Malang, A30-A37
- Penn, Michael., Pauer, James J dan Mihelcic, James R (2003). Biochemical Oxygen Demand. *Environmental and Ecological Chemistry*, Vol.II, 3-12
- Salim, Hilmi. 2002. Beban Pencemar Limbah Domestik dan Pertanian di DAS Citarum Hulu. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol.2, 107-111

- Satrio, Pandu & Suryani, Erma. 2017. Penerapan Model Sistem Dinamik untuk Melakukan Pemeliharaan Operasional Aset Unit Transmisi dan Visualisasi Luaran Model dengan Menggunakan Dashboard (Studi Kasus: PT.PLN (Persero) App Semarang. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 6, A327-A332
- Sterman, John D. (2000). *Business Dynamic: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Massachusetts Institute of Technology: McGraw-Hill
- Talling, J.F. (1956). Diurnal Changes of Stratification and Photosynthesis in some Tropical Africa. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 147 (926), 57-83

NOMENKLATUR

Xs = rata-rata nilai simulasi model
 Xa = rata-rata nilai aktual
 Ss = standar deviasi nilai simulasi model
 Sa = standar deviasi nilai aktual
 Si = nilai model pada periode waktu ke-i
 Ai = nilai aktual pada periode waktu ke-i
 N = interval waktu